

特集

IOWN構想特集 — デジタルツイン コンピューティング —

デジタルツイン



複製・交換・融合



シミュレーション
・未来予測

サイバーフィジカル
インタラクション



社会と倫理

実世界とサイバー空間とを結びつける「デジタルツイン」が、IoT（Internet of Things）の進展等により実現されてきている。NTTでは、ネットワークやコンピューティング環境の進化に伴い、あらゆる事物のデジタル化および実世界との融合がますます進展していく未来像を踏まえて、2019年6月に「デジタルツインコンピューティング構想」を発表した。本特集ではその取り組みについて紹介する。

Digital Twin

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

デジタルツインコンピューティング構想

デジタルツインコンピューティング構想の概要、適用範囲、アーキテクチャと実現に向けて取り組むべき主要課題について紹介する。

6

ヒトDTCの挑戦と今後の展望

ヒトDTCを用いた特徴的なユースケースとして、集団の合意形成、共感と他者理解、未来予測と成長について紹介する。

12

新たな社会を切り拓くモノのデジタルツインコンピューティング

ヒトとデジタル化されたモノとをインタラクション可能にする技術と、デジタル化されたモノやヒトの動きを大規模・高解像・高精度にシミュレーションする技術について紹介する。

18

実世界とサイバー世界を連動させるサイバーフィジカルインタラクションに

関する取り組み

運動機能における能力拡張を実現する生体信号デコーディング・フィードバック技術と、未来の予測結果をフィードバックすることで違和感のない操作を実現するゼロレイテンシメディア技術について紹介する。

24

デジタルツインコンピューティングの社会的課題

デジタルツインコンピューティングがリアルとバーチャルが融合した新しいデジタル社会を実現していくための社会的課題を、データ、自律エージェント、仮想社会と、セキュリティ・プライバシー、倫理・制度の3×2のマトリックスに分類して紹介する。

29

主役登場

数下 浩子（NTTデジタルツインコンピューティング研究センタ）

私が夢見るDTCの世界

35

Computing

デジタルツインコンピューティング構想

実世界とサイバー空間とを結びつける「デジタルツイン」が、IoT (Internet of Things) の進展等により実現されてきています。ネットワークやコンピューティング環境の進化に伴い、あらゆる事物のデジタル化および実世界との融合がますます進展していく未来像を踏まえて、2019年6月に「デジタルツインコンピューティング構想」を発表しました。本稿では構想の概要、適用範囲、アーキテクチャと実現に向けて取り組むべき主要課題について紹介します。

なかむら たかお
中村 高雄

NTT デジタルツインコンピューティング研究センタ

デジタルツインとは

実世界とサイバー空間とを結びつける「デジタルツイン」が、ICTの進展により実現され、注目されてきています。デジタルツインとは、例えば工場における生産機械、航空機のエンジン、自動車などの実世界の対象について、形状、状態、機能などをサイバー空間上へ写像し、正確に表現したものです。デジタルツインを用いることで、サイバー空間内で対象物に関する現状分析・将来予測・可能性のシミュレーションなどを行うことが可能となります。さらに、サイバー空間での処理結果に基づいて実世界の対象をインテリジェントに制御するなど、高度なICTの恩恵を実世界の対象にフィードバックさせることが可能になります。

今後、実世界のさまざまな対象のデジタルツイン化が進むことにより、産業を超えた異種・多様なデジタルツインの掛け合わせ・相互作用（インタラクション）による大規模なシミュレーション等に対する要請が高まってくると考えます。例えば、生産機械単体から、

生産ライン、工場全体、さらには流通などを含めたサプライチェーン全体の再現や、建物、道路、自動車、市民などを掛け合わせた都市全体の再現などです。しかし、現在のデジタルツインは目的ごとに作成・利用されていることから、このような自由な掛け合わせが困難です。また、ヒトのデジタルツインについては、これまでは生理学的な計測データなどによるモノ的な側面での再現が中心であり、コミュニケーションなどの社会的な行動に関するシミュレーションは困難です。

デジタルツインコンピューティングとは

私たちがめざす「デジタルツインコンピューティング (DTC)」は、これまでのデジタルツインの概念を大きく進展させるものであり、多様なデジタルツインを自在に掛け合わせてさまざまな演算を行うことにより、これまでになく大規模かつ高精度な実世界の再現、さらには実世界の物理的な再現を超えた、ヒトの内面をも含む相互作用をサイバー空間上で実現することを可能とする新たな計算パラダイムです（図1）。

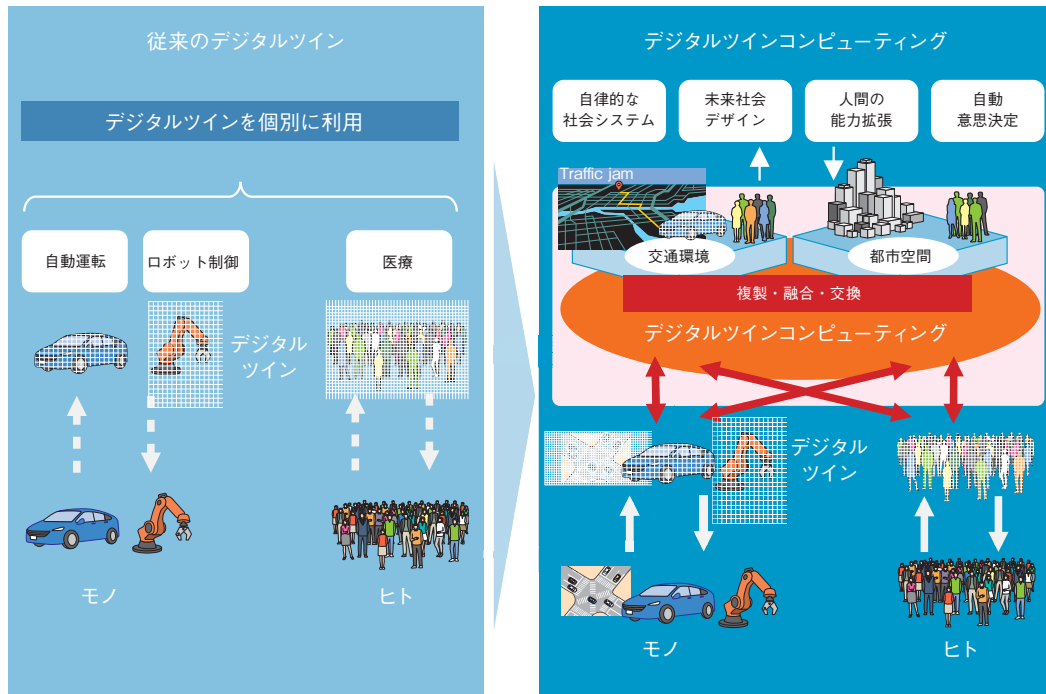


図1 デジタルツインコンピューティングコンセプト

DTCの特長の1つとして、さまざまなデジタルツインをサイバー空間上に配置し、相互作用により全体として駆動する1つの世界、すなわち仮想社会をつくり出すことが挙げられます。多様なデジタルツインを自由に掛け合わせて分析・試行・予測などを可能とするために、デジタルツイン間の大規模かつ複雑な相互作用のための共通的な手段を提供します。また、ありのままの現実をデジタル化するだけでなく、実世界とは異なる環境条件や存在しない対象を配置した仮想社会を構成することで、例えば未来都市のデザインなど、存在しない世界での試行等が可能となります。

DTCのもう1つの特長であるデジタルツイン演算は、デジタルツインを多数複製して

さまざまな試行等に活用する、あるいは異なるデジタルツイン間で構成要素の一部を交換や融合させて実在しない性質を持つデジタルツイン（派生デジタルツイン）を生成する等、複製や加工といったデジタル性の利点を活用するための操作です。派生デジタルツインを組み合わせることで、仮想社会を構築することで、実世界の機能や相互作用を拡張することが可能となります。

さらにもう1つ、DTCの大きな特長として、ヒトの内面の再現に挑戦することが挙げられます。例えば個々人の思考や判断をサイバー空間上で再現・表現することにより、ヒトの行動やコミュニケーションなどの社会的側面について、統計的に丸められた無個性な

個体間の相互作用ではなく、個性を踏まえた多様性に基づく相互作用が可能となるでしょう。本特集記事『ヒトDTCの挑戦と今後の展望』で詳しく述べます。

DTCでは、さまざまなモノやヒトどうしが実世界の制約を超えて高度に相互作用する多様な仮想社会をつくり出し、さらに仮想社会との融合により実世界が拡張・超越していきます。ヒトの活動範囲が仮想社会まで進展することによる人間の可能性の拡大、あるいは大規模シミュレーションや未来予測による複雑な社会課題解決のための社会デザインや意思決定支援など、これまで実現し得なかった革新的サービスの創出をめざしています。

適用域とユースケース

DTCの適用域とユースケースについて図2に示します。DTCではヒト1人を対象とするようなミクロでより深いレベルから、数人の集団、都市、国、そして地球規模といったマクロでより広範なレベルまで、取り扱うデジタルツインの規模・粒度をさまざまなスケールでとることができます。これにより、

- ・ 高度な判断プロセスや熟練スキルのデジタル化とリアルなヒト・モノへのフィードバックにより、人材育成コスト低減や労働力不足に対処する
- ・ 複数の人生を同時に歩んだ“複数の未来の自分”とそれぞれ会話をすることで、リア



図2 デジタルツインコンピューティングの適用域

ルの人生における選択を精緻な裏づけとともに実行する

- デジタル化された各分野の専門家が高速に議論し、災害・事故・犯罪等の事態に応じた対応策をスピーディに導出する
- 空間と時間の4D情報を活用して人流・交通流を制御し、気象、スケジュールまで組み合わせた混雑・渋滞解消やCO₂最少社会を実現する
- 都市における中長期的な社会活動の試行・予測に加え、未来の生活者の意見をシミュレーションし、それを設計にフィードバックすることで、将来に向けた適切な街づくりを実現する
- 地球全体の地形、気候変動等をデジタル化

し、大規模自然災害の予測・対策し、持続可能な国・街づくりを実現する

といった、幅広い適用範囲でさまざまなユースケースを考えることができます。

アーキテクチャと実現に向けた主要課題

DTCは、実世界のモノやヒトのセンシングによるデジタルツインの生成、デジタルツイン演算による派生デジタルツインの生成とそれらを掛け合わせた仮想社会の構築、そして実世界へのフィードバックを行います。DTCアーキテクチャは、図3に示すレイヤで構成されると想定されます。

- ① 実空間：実世界に現在存在するモノやヒト、およびそれらを含んだ現実の空間

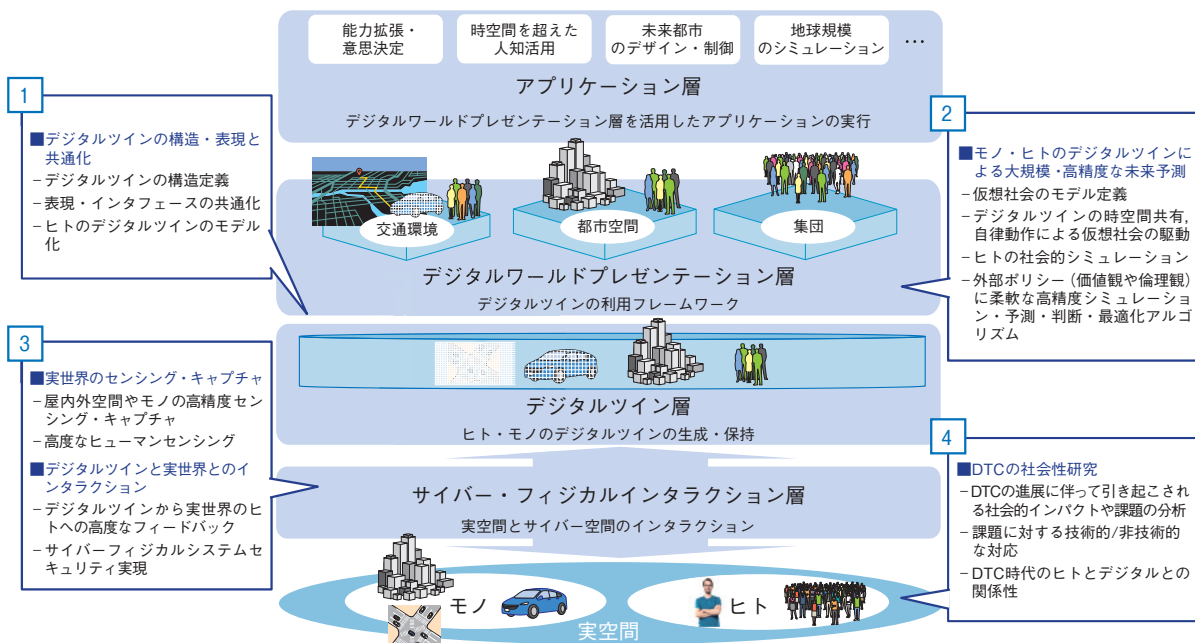


図3 デジタルツインコンピューティングアーキテクチャと実現に向けた主要課題

です。

- ② サイバー・フィジカルインタラクション層：実空間のモノやヒトのセンシングによりデジタルツインを生成するために必要となるデータを収集する機能と、仮想社会での試行や予測の結果を実空間にフィードバックする機能を提供します。
- ③ デジタルツイン層：収集されたデータやモデルの蓄積、およびそれらを用いたデジタルツインの生成・蓄積を行います。
- ④ デジタルワールドプレゼンテーション層：デジタルツイン層に格納されたデジタルツインに対する演算（複製・融合・交換）により派生デジタルツインを生成します。また、派生デジタルツインを組み合わせて仮想社会を構築します。
- ⑤ アプリケーション層：デジタルワールドプレゼンテーション層を活用したアプリケーションの実装を可能とし、実行します。

このアーキテクチャに沿って、前述のユースケースを含むDTCの実現に向けて取り組むべき主要課題を以下に示します。

(1) デジタルツインの構造・表現と共通化

デジタルツイン層に関しては、DTCのめざすデジタルツインの相互利用の枠組みとして、デジタルツインの構造定義および表現形式・インタフェースの共通化が必要です。また、ヒトのデジタルツインについては、ヒトの内面や個性の再現を含めた構成要素の定義およびセンシングデータからのモデル化・再現技術の確立が必要となります。

(2) モノ・ヒトのデジタルツインによる大規模・高精度な未来予測

デジタルワールドプレゼンテーション層に関しては、多様なデジタルツインを掛け合わせる場である仮想社会のモデル定義、配置されるデジタルツインの時空間共有と相互作用、個々のデジタルツインの自律動作による仮想社会駆動のメカニズムが必要となります。また、個々のヒトの思考や判断の再現に基づいて、対話・合議等のコミュニケーションや集団行動などの社会的シミュレーション方法の確立が必要です。そしてこれらをベースとして、社会規範や価値観、倫理観などの外部ポリシーに柔軟に対応して適切な計算結果を導くことが可能な、高精度シミュレーション・予測・判断・最適化アルゴリズムの確立が必要となります。本特集記事『新たな社会を切り拓くモノのデジタルツインコンピューティング』で取り組みについて紹介します。

(3) 実世界のセンシング・キャプチャ、デジタルツインと実世界とのインタラクション

サイバーフィジカルインタラクション層に関しては、屋外の建物・道路や室内構造といった空間や静的対象に加え、走行する自動車などの動的対象の高精度なセンシング・キャプチャが必要です。また、ヒトのデジタルツインがユーザの内面や個性まで再現するために、ウェアラブルデバイス・カメラ・マイクによる計測データやネット上での行動データ等を統合する高度なヒューマンセンシング技術が必要となります。また、サイバー

空間上の経験を実世界のヒトにフィードバックさせて、デジタルツインを介した仮想社会での活動や、サイバー空間の力を借りた実世界の能力拡張を可能とするために、高度なHMI（Human Machine Interface）デバイスなどを用いたフィードバック方法も必要となります。本特集記事『実世界とサイバー世界を連動させるサイバーフィジカルインタラクションに関する取り組み』で紹介します。

実世界とサイバー空間の融合が進むDTCの世界では、CPS（Cyber Physical System）セキュリティもこれまで以上に求められます。

(4) DTCの社会性研究

DTCの進展に伴って、例えばプライバシーの観点やデジタル犯罪等のリスク、未来予測と自由意志や責任に関する倫理的観点、ボーダーレスなデジタル社会における価値観の変容など、引き起こされるさまざまな社会的インパクトや課題に関する分析と、課題に対する技術的・非技術的な対応が求められます。またDTCの社会受容に向けて、ヒトとデジタルとの新たな関係性についての人文・社会的な研究も求められるでしょう。本特集記事『デジタルツインコンピューティングの社会的課題』で詳細を述べます。

おわりに

前述のとおり、DTC構想の実現に向けた課題は非常に広範な領域に及びます。NTT研究所では、幅広い学術・技術分野の専門家や産業界のパートナーの方々とのコラボレー

ションにより、課題解決や社会実装を進めDTC構想の実現をめざしていきます。DTC構想に関するより詳しい内容は「デジタルツインコンピューティング ホワイトペーパー」⁽²⁾をご覧ください。

■参考文献

- (1) <https://www.ntt.co.jp/news2019/1906/190610a.html>
- (2) <https://www.ntt.co.jp/svlab/DTC/whitepaper.html>



中村 高雄

パートナーの皆様と連携して高いハードルにチャレンジし、DTC構想の描く将来の新たな価値の実現をめざしていきます。

◆問い合わせ先

NTT デジタルツインコンピューティング研究センター
E-mail dtc-office-ml@hco.ntt.co.jp

ヒトDTCの挑戦と今後の展望

ヒトDTC（ヒトデジタルツインコンピューティング）は、ヒトの外面に関するデジタル表現だけでなく、内面までのデジタル表現をめざします。ヒトの人格や思考といった内面を含む情報をデジタル化することで、今までにない価値を生み出すことができると考えています。本稿では、ヒトDTCを用いた特徴的なユースケースとして、集団の合意形成、共感と他者理解、未来予測と成長について紹介します。また、社会へヒトDTCを浸透させるための課題など、これからのヒトDTCプロジェクトの方向性について述べます。

としま いわき
戸嶋 巖樹

のと はじめ
能登 肇

ひろた けいいち
廣田 啓一

こばしかわ さとし
小橋川 哲

くらはし たかお
倉橋 孝雄

おざわ しろう
小澤 史朗

NTT デジタルツインコンピューティング研究センタ

はじめに

DTCにおけるヒトのデジタルツインは、ヒトの活動範囲を実世界からサイバー空間まで拡大することを可能にします。自分とサイバー空間上のあらゆるデジタルツインとのインタラクションは自らのデジタルツインを通じて行われます。さらに、その結果を実世界

の自分にフィードバックさせることで、サイバー空間での活動から得られる経験を実世界と同様に得ることが可能となります（図1）。この時、身体的・生理学的な特徴といったヒトの外面に関するデジタル表現だけでなく、内面までのデジタル表現をめざします。ヒトの個性・特徴を再現するモデル（例えば、行動傾向、性格、価値観をモデル化した人格・

実世界からサイバー空間まで
範囲を拡大して活動するヒト

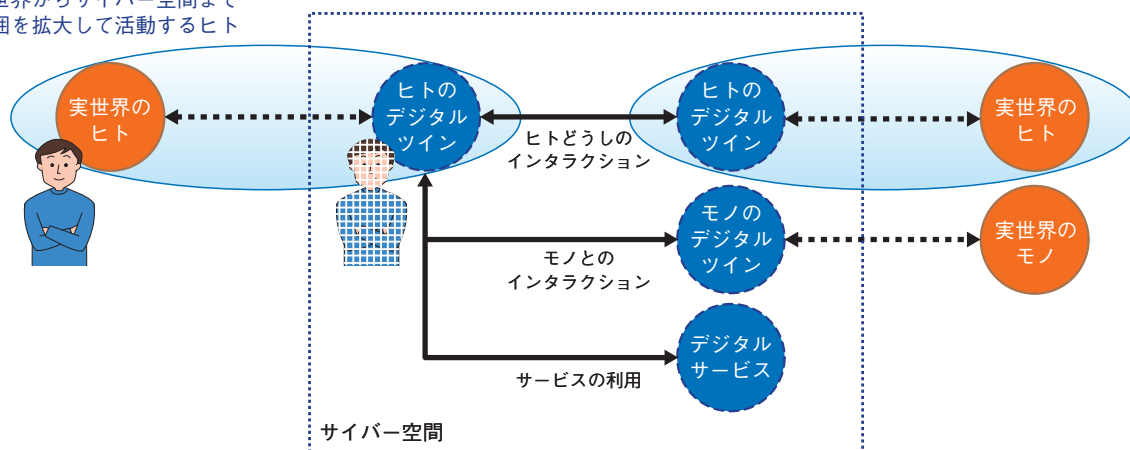


図1 ヒトのデジタルツインを介したサイバー空間でのインタラクション

思考モデルや、知覚、知識、言語能力、身体能力などをモデル化した能力モデルなど）はデジタルツインの振る舞いを規定し、サイバー空間における他者からの働きかけに対してあたかも本人のように反応することに加え、仮想社会において自律的に駆動させることで、本人のように他者に対して働きかけを行うこともできるようにします（図2）。このようにヒトのデジタルツインを発展させ、利用可能とするシステム全体について、ヒトDTC（ヒトデジタルツインコンピューティング）と定義しています。

本稿では、最初にヒトDTCのもたらす価値を整理し、その価値に対応する具体的なユースケースについて説明します。次にDTCを実現するうえで避けて通れない社会に受け入れられるために必要な検討について

整理し、最後にプロジェクトの長期的展望について述べます。

ヒトDTCの価値

ヒトのデジタルツインは状態や行動を表すデータだけでなく、判断や行動の傾向といったヒトの個性や感情を表現するモデルも有することで、仮想社会における他者とのインタラクションや自律的な活動を、あたかも自分自身のように行うことを可能にします。このことは、本質的に3種類の価値をもたらすと考えています。1番目は、物理的制約を超えて、さまざまなタスクを代替可能とすることです。中でもサイバー空間におけるコミュニケーションでは、実在のヒトどうしのコミュニケーションで行われるような実時間処理を超えて、膨大な処理を高速に行うことができ

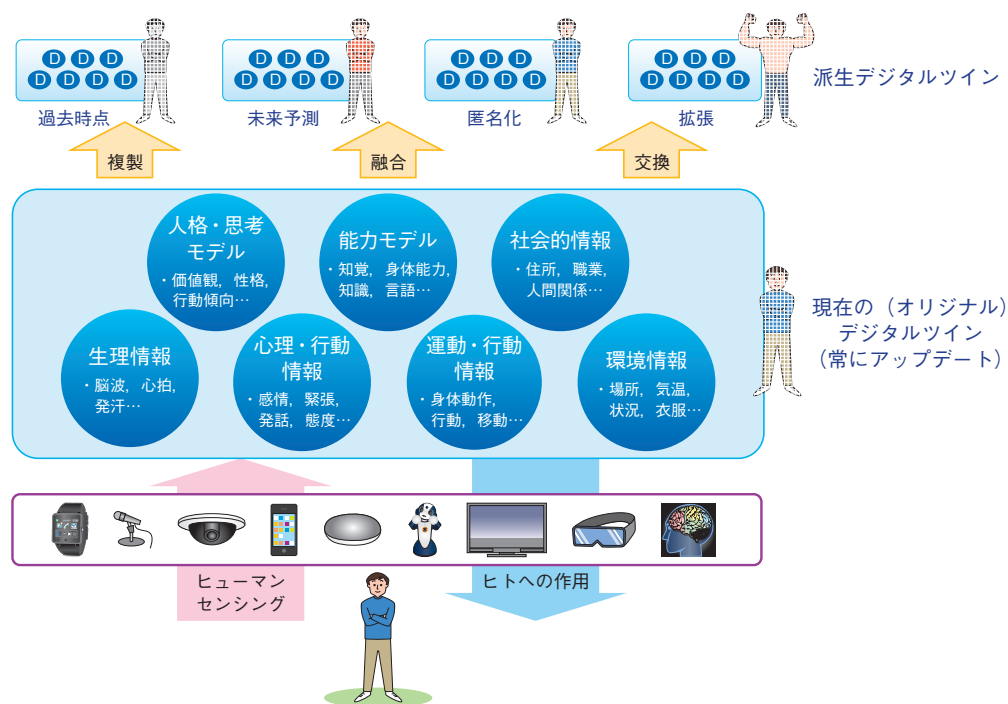


図2 DTCにおけるヒトのデジタルツイン

ます。2番目の価値は、感情を表現するモデルを持つことで、感情をそのまま伝達することが可能となることです。この世界では、ニュアンスをそのまま伝えることができるため、想いがすれ違わない世界を創ることが出来ます。最後の価値は、社会的側面や多様性に基づくインタラクションが実現できることで、ヒトの個性まで考慮した精密な分析、そして未来の予測が可能となることです。本人の行動変容の参考にするなど、さまざまな使い方が考えられる価値です。これらの価値の根源は、ヒトの個性を実装し、感情のモデルを実現することにあります。ヒトDTCにおいては、この「ヒトの個性」を扱うことをもっとも重要な課題の1つととらえて研究開発を推進します。

ヒトDTCのユースケース

■ 集団の合意形成

ヒトのデジタルツインは、個人の知識や経験などの記憶を持ち、まるで本人と同じような個性や価値観を持ちながら、思考・判断を行うことができるため、実世界の本人に代わり、さまざまなタスクに従事させることが可能です（図3）。特にDTCでは、実世界で行われるものと同じコミュニケーションをデジタルツインが代替することで、複数の人とのコミュニケーションを必要とするような高度なタスクを実行できるようになります。その代表的な例は会議における合意形成です。DTCを活用した合意形成では、実世界の人を介さず複数のデジタルツインからなる集団の考え方の傾向をシミュレーションしてタイムリーに可視化したり、その場にはいない有

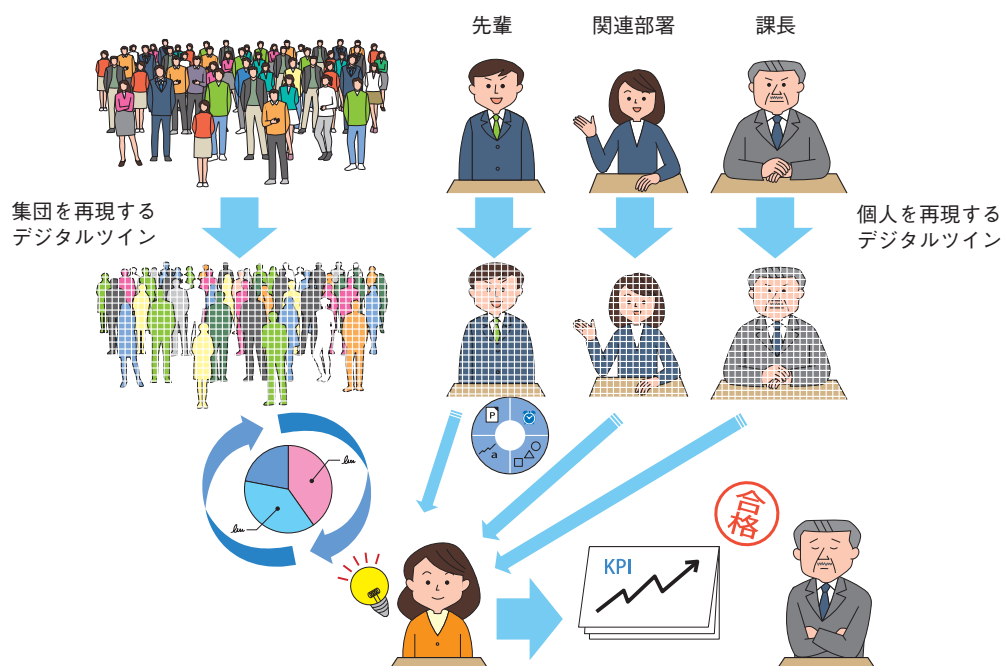


図3 ヒトのデジタルツインによる集団の合意形成

識者のデジタルツインからの働きかけにより個人の内面にある暗黙知を引き出したりすることで、その集団ならではの新たなアイデアの創発や意思決定がスムーズに実現できることが期待できます。また、DTCではデジタルツインの「複製」によって、実世界の状態とは関係なく同時に複数の仮想社会にデジタルツインを存在させることができるため、実世界では時間・空間の制約上ではこれまで不可能であった超多数人の合意形成が瞬時に可能になると考えています。

■ 共感と他者理解

感覚や感情のデジタル化も、ヒトのデジタルツインを生み出すための重要な要素です。本人のスキャン情報からデジタルツインとして復元した感覚・感情を、DTCを用いて相手の理解できるかたちに変換し、現実空間にフィードバックすることにより、お互いに分かり合っている共感状態を生み出すことができます(図4)。感覚や感情を用いた共感が役立つ例として、診察室での患者に対する医師の診断が挙げられます。現実の診断では、患者は医師に対して痛みのような感覚や不安といった感情を言葉で定性的に伝えることのみができます。また痛みを定量化できたとしても、個々人が得る感覚や感情は人によって異なります。そのため、患者は医師に正しく伝えることができたのか、また医師は患者が正しく説明しているのかを判断することは困難です。DTCによる診断では、デジタル化した痛みの感覚や不安な感情をDTCにより相手に伝わるかたちに変換してからフィードバックすることにより、相手への正しい伝達を可能にします。ヒトのデジタルツインを用

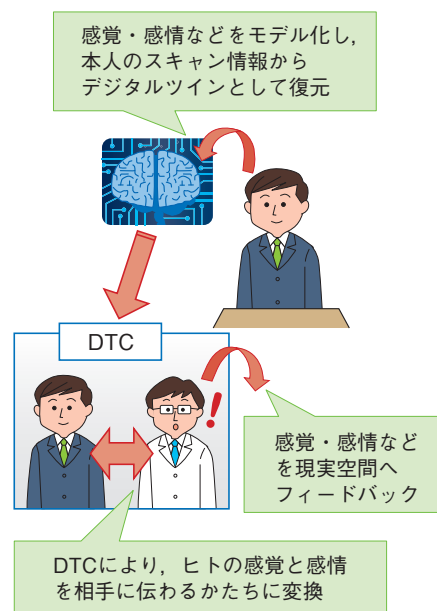


図4 ヒトのデジタルツインによる感覚の共有

いた共感の実現は、今までのコミュニケーションを大きく変革し、言葉にしたことが相手に分かるように伝わるだけでなく、言葉にできない・しないことも相手に分かるように伝わる世界を実現します。

■ 未来予測と成長

DTCにおけるヒトのデジタルツインでは、個々のヒトに対するミクロなレベルのシミュレーション結果を、自身の行動などを決定するために利用することも可能です(図5)。「融合」や「交換」によって、新たな知識や能力を付与した派生デジタルツインを用いることで、もし新しい知識を身に付けたらどうなるのか、といった別の未来の可能性を予測し、社会や自身を成長させるために利用することが期待できます。自身を成長させるという例として、新たな語学の学習などが挙げられます。自己の成長は、自身の動機付けや目標設定があり、それを実現するための身体的活動

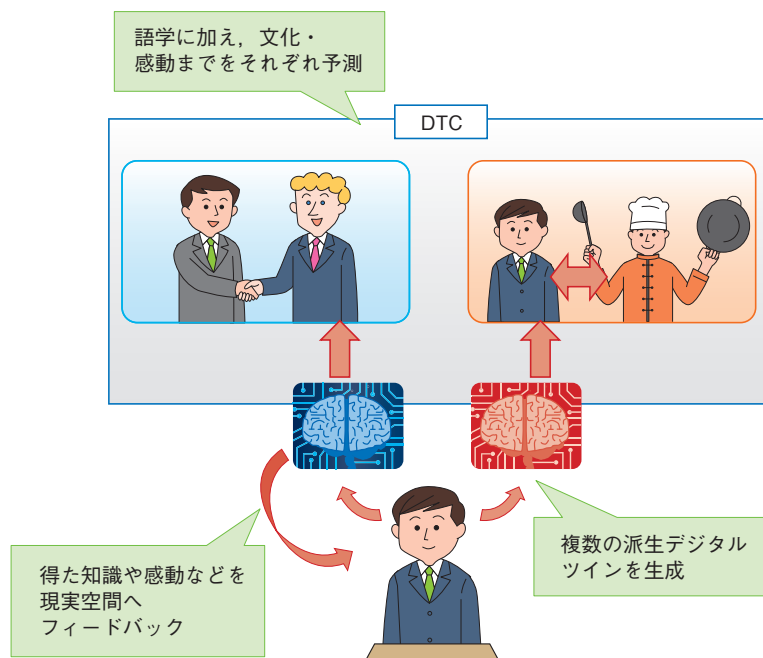


図5 ヒトのデジタルツインによる未来予測と成長

や知的活動での経験を通じて得られるものです。DTCにおけるヒトのデジタルツインでは、自己の派生デジタルツインを複数創生し、習得したい語学すべてをそれぞれの派生デジタルツインを用いることでシミュレーションすることができます。英語やドイツ語、フランス語などを仮想社会内の他者デジタルツインとの交流を通じ、実践的な学習に加え、指導を受けることや、交流を実際に体験したときの感情や感動も得ることができます。これらシミュレーション結果を用いて、自身が習得しやすい言語、感動をより得やすい国などの新たな知識を実世界の自身にフィードバックし成長を促進・サポートするのです。

ヒトDTCの社会受容性とセキュリティ

これまで述べたように、DTCはヒトの能力を拡張し、有益な結果をもたらすことが期

待されます。一方で、私たちがこの恩恵を受けるためには、DTCの世界観に対する社会受容性についても十分に考慮されなければなりません。自分と同じ外観と思考を有するヒトDTCがつくられることに対する心理的な抵抗感、自分に関する多様な情報が集約されることに対するプライバシー意識など、認知度と個人の受容性を高める啓蒙が不可欠です。また、ヒトDTCが既存の人と同じような経済活動をすることで、法制度の運用、あるいは法制度そのものの変容をもたらすかもしれません。ヒトDTCが人の知識・能力を倍化し、人の何倍もの活動を提供することによる、社会的影響や経済的影響は大きなパラダイムシフトを引き起こすことでしょう。こうしたDTCの実現と普及が現実社会にもたらすさまざまな影響について、哲学や倫理学といった人文学的な分野、法学、社会心理学や行動

経済学といった社会学的な分野などの有識者と議論を交わしながら、DTCのあるべき姿を模索していく必要があります。

また、ヒトDTCやモノDTCが現実社会の情報をすべて反映したものであるとする場合、そこから起こり得る脅威やリスクはさまざまであり、それらに対するセキュリティを十分に検討し、技術的・非技術的にかかわらず、さまざまな側面から対処を行う必要があります。倫理規定や法的な概念を導入し、現実世界と同等の秩序あるDTC世界を実現するとともに、これまで長年培ったセキュリティ技術とサイバーセキュリティの活動から得られた多くの知見を基に、セキュリティバイデザイン、プライバシーバイデザインの考えにのったDTCのセキュリティをつくり上げていきます。

おわりに

ヒトDTCに関する研究は、本稿で挙げたようないくつかのゴールを思い描き、まさにスタートしたばかりです。しかし、ベースとなる技術、例えば音声・言語・画像等の認識や生成技術はAI（人工知能）によって大きく進化しています。これらの技術に対して、ヒトの個性に着目したり、よりヒトの内面に踏み込んだりすることで、DTCの研究開発を加速したいと考えています。また、個性や内面への踏み込みの観点や社会への浸透の観点では、AI分野の技術以外にも、脳科学をはじめとした生物・医学分野や、倫理・哲学から行動経済学のような人文系分野など、工学を離れた分野や、学際領域的な分野にも広げる必要があります。私たちヒトDTC研究

チームは、自らの研究を進めるだけでなく、これらの非常に幅広い分野の研究を、私たちがハブとなって結びつけることで技術的な実現を推進するとともに、世界に対してDTCがもたらす価値を共感してもらうことで、それが受容される社会規範の変容をもたらすことが大きな役割だと考えています。



(上段左から) 戸嶋 巖樹 / 小橋川 哲 / 能登 肇

(下段左から) 倉橋 孝雄 / 廣田 啓一 / 小澤 史朗

ヒトのデジタルツインコンピューティングは、将来に向けて大きな可能性があります。一方で、実現には技術的、非技術的にさまざまな課題があり、社内外と積極的に連携して解決に取り組み、強力に挑戦してまいります。

◆問い合わせ先

NTT デジタルツインコンピューティング研究センター
第一グループ
E-mail dtc-office-ml@hco.ntt.co.jp

新たな社会を切り拓くモノの デジタルツインコンピューティング

デジタルツインコンピューティング構想では、ヒトに加え、モノも高精度にデジタル化し、デジタル化されたモノを実在するヒトが活用することで、ヒトの生活をより良いものにすることをめざしています。そのため私たちは、ヒトとデジタル化されたモノとをインタラクション可能にする技術と、デジタル化されたモノやヒトの動きを大規模・高解像・高精度にシミュレーションする技術に取り組んでいます。本稿では、これらの技術への取り組みについて解説します。

まるよし まさひろ
丸吉 政博

かわたに むねゆき
川谷 宗之

もり こうや
森 航哉

NTT デジタルツインコンピューティング研究センタ

はじめに

NTT デジタルツインコンピューティング研究センタでは、デジタルツインコンピューティングにおける「実空間のデジタルツイン化技術」、および「大規模リアルタイムシミュレーション技術」に取り組んでいます。「実空間のデジタルツイン化技術」では、物理的に存在するモノの形状・状態等をデジタル化し、実在するヒトがこれらデジタル化されたモノを実空間内で共有・操作できる空間（デジタルツイン空間）の実現をめざしています。モノをデジタル化する技術として、すでに物体を3次元データ化する3Dモデリング技術等が提案されており、これらの既存技術を要素技術として統合することによりデジタルツイン空間の実現を進めていきます。「大規模リアルタイムシミュレーション技術」では、都市や国全体等の広域な空間上で、精緻にデジタル再現された人流、交通流、気象条件、

エネルギー流等を、ダイナミック、リアルタイムかつ高精度に予測することで、都市機能のリアルタイム制御や、都市機能の改善による都市生活への影響評価に役立てることなどをめざしています。本稿では、「実空間のデジタルツイン化技術」における、現状の技術動向と課題、および「大規模リアルタイムシミュレーション技術」における現状の取り組みを述べます。

実空間のデジタルツイン化技術

ヒトがデジタル化されたモノを利用する場合、これまではマウス、キーボード、タッチパネル等のさまざまなインタラクション手段が用いられてきました。今後は、ヒトの視覚・聴覚・触覚を用いた、より直観的かつ直接的にデジタル化されたモノを利用することが、さらに重要になると考えています。このためには、すでに提案されているヘッドマウントディスプレイやVRグラス等のウェアラブル

デバイス等のハードウェア技術に加えて、物理的なモノを3次元デジタル化する「3Dモデリング技術」も重要となります。「3Dモデリング技術」は、モノの「大きさ」と「移動できるか（可搬性）」に依存して以下の3つに分類できます。

- ①無限に広がり可搬性のない「地理空間のデジタル化技術」
- ②巨大かつ可搬性のない「建造物のデジタル化技術」
- ③大小さまざまな大きさで可搬性のある「モノのデジタル化技術」

以降では、これらの分類に沿った技術の動向を説明します。

■無限に広がり可搬性のない「地理空間のデジタル化技術」

都市等の地理空間的な情報（地形情報）のデジタル化と、そこに付随する情報を付加し、地形情報と付加情報を統合的に活用するシステムとしてGIS（Geographic Information System）が用いられてきました。地形情報をデジタル化するために、航空機からのレーダー測位や衛星画像からの形状抽出が行われます。また、緯度・経度・標高の座標系を基準に、これらの地形情報に加え、平面地図とその地形情報、国境・地物といった分析対象ごとにレイヤを用意し、重ね合わせられます。これらの情報は、広範囲な情報を実用的な速度で描画できる特徴点数や位置精度となっているため、マクロな表現に優れている特徴が

あります。

■巨大かつ可搬性のない「建造物のデジタル化技術」

建物や道路・橋などの建造物では、建造物で利用される材質、強度などの属性管理と合わせて、建物の構造を3Dモデルとして設計するBIM（Building Information Modeling）/ CIM（Construction Information Modeling）が用いられてきました。実物を建築する目的から、精度が高いためミクロな表現に優れています。また、その3DモデルをGIS上に配置することで都市の表現が可能（図1）であり、近年はGISとともにオープンな都市モデルとして公開する動きが出ています^{(1),(2)}。

■大小さまざまな大きさで可搬性のある「モノのデジタル化技術」

私たちの身の回りのさまざまな工業製品の構造を3Dモデルとして設計するために、CAD（Computer Aided Design）が利用されています。CADを用いることにより、実物を製造する前に、モノどうしの衝突判定や、物理シミュレーションを用いた歪み計測なども可能となります。実物を製造する目的から、精度が高いためミクロな表現に優れています。一方で、さまざまな産業分野ごとにデータ形式が異なっており、データ形式の共通化が図られている状況ではありません。

また、近年、実在するモノの動画像から特徴点を推定し3Dモデル化する「フォトグラ



BIMツールであるAutodesk Revitの建物データ⁽¹⁾(※CC BY-NC-SA 3.0)を、GISツールであるEsri ArcGIS⁽²⁾にて地図上に配置。これにより形状が正確な都市モデルの構築が可能だが、配置には手動による位置合わせが必要。

図1 GISとBIMの3Dモデルによる都市モデルの作成例

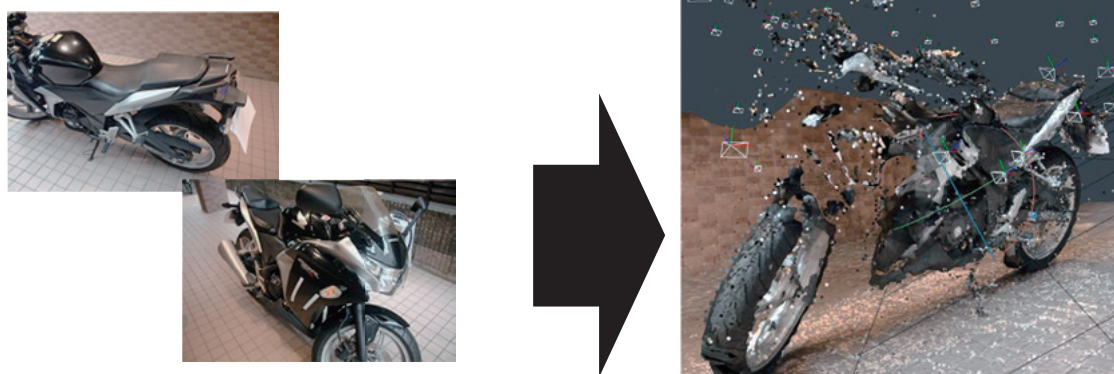
メトリ技術」⁽³⁾(図2)や、レーダー測定による形状抽出の技術も提案されています⁽⁴⁾。あらゆるモノを画像から3Dモデル化できるという利点がある一方、その抽出精度は光などの環境に依存しますし、動きのあるモノのリアルタイムな抽出は残像処理などの課題が多いです。

実空間のデジタルツイン化技術の課題

DTCでは、実在のヒトが実空間に存在するさまざまなモノとインタラクション可能とするために、実在するモノをデジタル化します。ここで、「インタラクション可能」とは、例えば「モノに触れたときに肌触りを感じる」といった感覚へのフィードバックから、「モノに触れるとその利用履歴が分かる」といっ

た情報のフィードバックまでさまざまなことが考えられます。

前述した3Dモデリング技術では、産業分野ごとの用途に合わせて属性が定義されていますが、デジタル化されたモノが実在のヒトとインタラクションすることを前提とした属性は考慮されていません。また、第三者によってデジタル化されたモノを、都市のように地理的広がりを持ち、建物が並び実空間上に配置し、複数のヒトどうしが同時に触る等、リアルタイムかつダイナミックにデジタル化されたモノを動かせるデジタルツイン空間を構成するには、さまざまな産業分野でつくられてきた異なる属性(3次元座標系、精度、データ形式等)を共通化するなど、統合的な管理が必要となります。



入力画像
(位置・向きを変えた画像を100枚以上用意)

抽出した 3Dモデル
(鏡面反射の強い部分は抽出できていない)

図2 フォトグラメトリ技術を実装したツール (Meshroom) による 3D モデル抽出例

私たちは、モノのデジタルツインが、インタラクション可能とするために備えるべき属性、および異なる産業分野で生成されているデジタル化されたモノを1つの実空間上で統合的に扱うことができるようにするためのインタフェース条件等を、1つのフレームワークとして形成することをめざします。

大規模リアルタイムシミュレーション技術

大規模リアルタイムシミュレーション技術では、デジタル化された都市空間を構成するデジタルツインを用いたシミュレーションにより、人流、交通流、物流、エネルギー流等の都市全体の営みのリアルタイム最適制御や、都市や行政の中長期的な計画立案、意思決定を可能とすることをめざしています。このDTCにおけるシミュレーションは、「広域」

「高精度」を特徴としています。以降では、それぞれについて課題と取り組みを説明します。

(1) 広域シミュレーション

都市のシミュレーションには、都市に暮らす人々とその営み、自動車などの交通機関、気象などの環境のシミュレーションが含まれます。東京を例にとると、人口は1300万人以上、350万台を超える自動車が保有されています^{(5), (6)}。これらのシミュレーションを単一の計算機で行うことは現実的ではなく、例えば東京をいくつかの領域に分割し、それぞれの領域を並列分散処理する方法が考えられます。ただ、この場合、分割した領域をまたいで移動する人や自動車を考慮しなければなりません(図3)。私たちは、このような領域をまたいだ移動も想定した広域シミュレーションの研究を行っています。

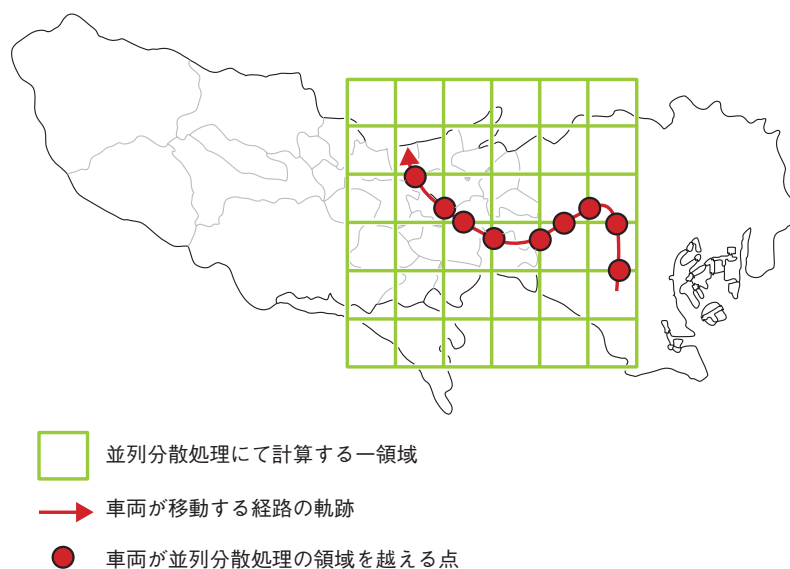


図3 並列処理の領域をまたいで移動する車両の例

(2) 高精度シミュレーション

都市全体の営みのリアルタイムな最適制御や都市や行政の計画立案・意思決定に、シミュレーションを用いる場合、シミュレーションの結果の精度を高めることは必要不可欠です。

そのために、例えば、1人ひとりの住民から、車1台1台、建物の間を通り抜ける風の流れや陽当たりなど、これまではあまり考慮されてこなかった計算要素をシミュレーションに含めることで精度を向上する方法が考えられます。しかし、これらの計算要素を単純に増やした場合、計算量が膨大になってしまうため、どの計算要素がシミュレーション結果に強く影響を与えるかを明らかにし、シミュレーションに取り込む方法を研究しています。

また、例えば、交通事故やゲリラ豪雨など、

過去の事象からは簡単には予測できない不確実な現象により生じるシミュレーション結果の変動も考慮する必要があります。それら不確実な事象の発生も考慮しシミュレーションを行うには、計算機上での数値解析だけでなく、現実世界で発生した事象をリアルタイムにシミュレーション計算に反映させ、現実世界の事象に近づけていく必要があります。私たちはその技術の研究を行っています（図4）。

私たちは、これらの取り組みにより大規模、高解像、高精度な都市シミュレーションを実現し、都市の営みの最適化や人間の意思決定に役立てていくことをめざしています。

今後の展望

私たちは、モノと空間をインタラクション

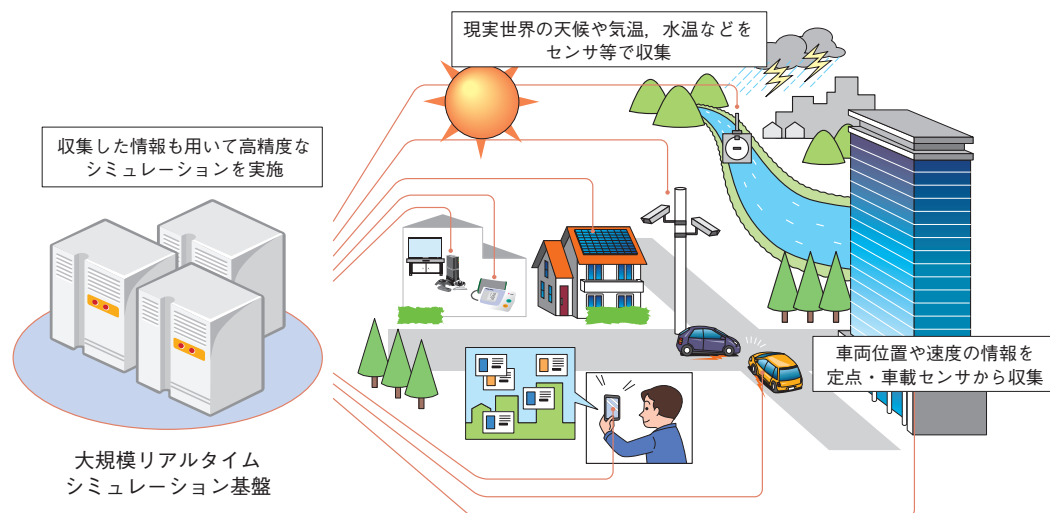
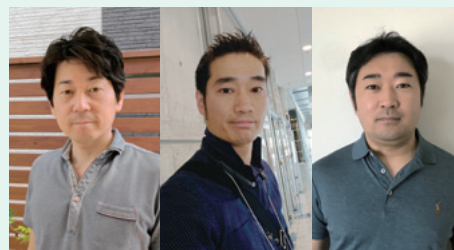


図4 現実世界の現象を利用したシミュレーション

可能なものとして高精度かつリアルタイムにデジタル化する技術と、そのデジタル空間で未来を予測しその予測結果を現実にフィードバックする技術の研究開発に取り組んでいきます。その中で、4D デジタル基盤⁽⁷⁾の実現も推進していきます。また、DTC 構想の実現のために企業・業界を超えたパートナーリング戦略を推進していきます。

■参考文献

- (1) <https://knowledge.autodesk.com/ja/support/revit-products/getting-started/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/JPN/Revit-GetStarted/files/GUID-7B9C7A69-1083-406D-A01F-53D405C167F3-htm.html>
- (2) <https://www.esri.com/products/arcgis/>
- (3) <https://alicevision.org/>
- (4) D. Zou, P. Tan, and W. Yu: "Collaborative visual SLAM for multiple agents: A brief survey," Virtual Reality & Intelligent Hardware, Vol.1, No.5, pp.461-482, 2019.
- (5) <https://www.toukei.metro.tokyo.lg.jp/jsuikai/js-index.htm>
- (6) https://www.airia.or.jp/publish/statistics/ub83e100000000wo-att/01_2.pdf
- (7) <https://www.ntt.co.jp/news2020/2003/200326c.html>



(左から) 丸吉 政博 / 川谷 宗之 / 森 航哉

NTT デジタルツインコンピューティング研究センタでは、DTC 構想の実現に向けて、企業間連携も積極的に推進しながら研究開発を進めています。

◆問い合わせ先

NTT デジタルツインコンピューティング研究センタ
E-mail dtc-office-ml@hco.ntt.co.jp

実世界とサイバー世界を連動させるサイバーフィジカルインタラクションに関する取り組み

デジタルツインコンピューティング実現に向け、実世界とサイバー世界をつなぐサイバーフィジカルインタラクション層で取り組む技術のうち、ヒトのデジタルツインにおける演算処理の結果を実世界のヒトへフィードバックすることにより運動機能における能力拡張を実現する生体信号デコーディング・フィードバック技術と、実世界の物理的な距離と、ヒトに認知的な時間感覚を超え、遅延を解消させる予測提示をフィードバックすることで違和感のない操作を実現するゼロレイテンシメディア技術について紹介します。

こいけ ゆきお
小池 幸生

まつばやし たつし
松林 達史

こんどう しげくに
近藤 重邦

NTT サービスエボリューション研究所

実世界とサイバー世界を連動させるサイバーフィジカルインタラクション

NTT 研究所では、さまざまなモノやヒトどうしが実世界の制約を超えて高度に相互作用することで多様な仮想社会をつくり出し、仮想社会と実世界の融合によりヒトの活動範囲や可能性の拡大するサービスを創出する、デジタルツインコンピューティング (DTC) 構想の実現をめざしています。本稿では、実世界とサイバー世界をつなぐサイバーフィジカルインタラクション層で取り組む技術のうち、ヒトのデジタルツインにおける演算処理の結果を実世界のヒトへフィードバックすることにより運動機能における能力拡張を実現する生体信号デコーディング・フィードバック技術と、世界の物理的な距離と、ヒトに認知的な時間感覚を超え、遅延を解消させる予測提示をフィードバックすることで違和感のない操作を実現するゼロレイテンシメディア

技術について紹介します (図)。

DTC 構想実現に向けた生体信号デコーディング・フィードバック技術

DTC におけるヒトのデジタルツインは、実世界の自分がサイバー空間上のさまざまなデジタルツインと、またさらにその先にいる実世界のヒトとインタラクションするためのインタフェースであるという側面を持ちます。具体的には、HMI (Human Machine Interface) を通じて、サイバー空間での経験を実世界の自分に伝えることを可能とするものであり、HMI がデジタルツインと実世界とのインタラクションにおいて重要な役割を担うものです⁽¹⁾。デジタルツイン演算のキーコンセプトの1つである「交換・融合」によって、ヒトのデジタルツインは単なるヒトの再現でなく、サイバー空間での能力拡張が可能となります。その能力をヒトが実世界で発揮する際にも同じく HMI が重要な役割を担い

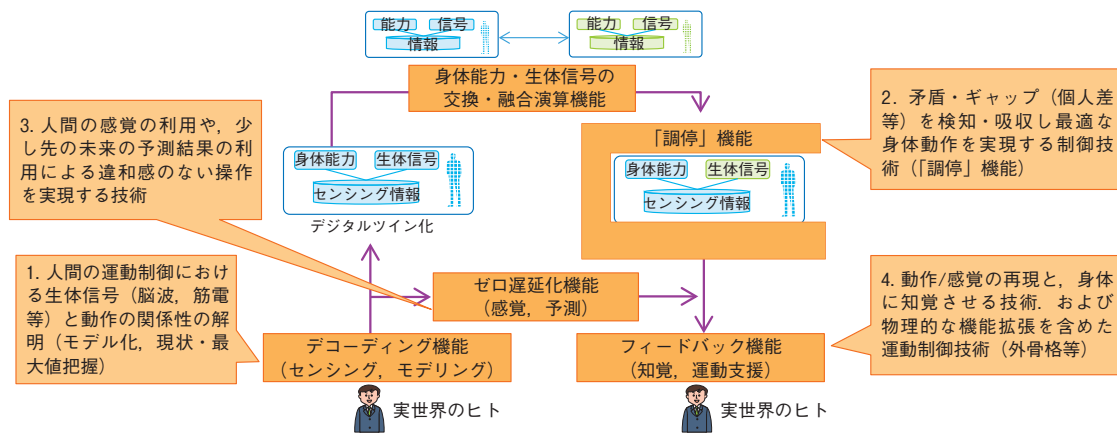


図 サイバーフィジカルインタラクション層を支える技術

ます。

私たちは、人の能力拡張、特にサイバー空間と実世界ともに重要な要素となる運動機能における能力拡張の観点から、それを実現するためのHMI技術（生体信号デコーディング*・フィードバック技術）への取り組みを開始しました。

人体における運動制御は一般的に、感覚器で受けた刺激が神経系を通じて脳によって知覚され、脳内で行動計画等の認知的活動が生じ、遂行すべき運動の指令を筋骨格系に対して神経系を通じて伝達し、信号を受けた筋肉が収縮することで成立します⁽²⁾。これら感覚系機能、神経系機能、筋骨格系機能および機能間を伝達する生体信号のヒトのデジタルツイン間における交換・融合、およびその結果を実世界のヒトへフィードバックすることによる各機能の強化、信号の流通の実現が、めざす運動機能における能力拡張です。熟練者の運動制御機能や生体信号を訓練者へ投影し

ての訓練や物理的な支援による運動能力拡張が可能となります。

運動機能における能力拡張を実世界のヒトへフィードバックし、ヒトの運動能力拡張を実現するために、生体信号のデコーディングとフィードバックを中心とした以下の技術が重要と考え、これらを生体信号デコーディング・フィードバック技術として取り組みます。

- ・人間の運動制御における各機能要素間の生体信号（脳波、筋電図等）と動作の関係性の説明およびデジタル化（デコーディングによるデジタル情報化および再現性の高い感覚・運動信号の時空間特徴量抽出手法とパタン化）
- ・デコード情報を元とし矛盾・ギャップを検知・吸収し最適な身体動作を実現する運動制御技術（「調停」機能）

* デコーディング：生体信号の解析・理解（脳波からの感覚再現等）。

・動作/感覚の再現と身体に知覚させる技術，および物理的な機能拡張を含めた運動制御技術（外骨格活用とその制御方式）

特に「調停」機能はデジタルツイン演算による能力拡張実現において重要な役割を果たすと考えています。人の運動制御における各機能および信号をデジタルツイン間で「交換・融合」する場合，単に実世界にフィードバックを行うだけではなく，実世界にフィードバックを行う際に生じることが想定されるデジタルツイン情報と実世界との矛盾・ギャップを検知し調整する必要があるからです。より具体的には，各機能および信号における個人差の吸収や，デジタルツインと実世界のヒトとの状態の差異の吸収が必要です。例えば運動熟練者の生体信号を未習熟者にフィードバックする場合，未習熟者の筋力，関節可動域限界や現状の姿勢からそもそも期待どおりに動作しない可能性や，筋繊維断裂や関節の損傷など安全面でも問題がある可能性があります。そのためその人に合わせて信号強度を調節することや，より適した動きになるよう信号の変換を施したうえでフィードバックする「調停」機能を備えた新たなHMI技術実現により，能力拡張されたヒトが，あたかも自分の身体そのものであるかのように動作させることができる世界をめざします。

DTC構想の中核であるデジタルツイン演算「交換・融合」をヒトに適用し，ヒトの能力拡張実現に向け，生体信号デコーディング・フィードバック技術研究開発を進めます。

DTC 構想に向けた ゼロレイテンシメディア技術

実世界においては，ヒトやモノにはそれぞれ固有の空間的座標軸と時間軸が定まり，空間と時間の概念は密接に紐付けて考えられています。視覚情報であれば光速で，聴覚情報であれば音速で情報の交換が行われており，情報伝達は物理的に光の速度を超えることはできません。そのため遠隔のモノを操作する際には必ず遅延が生じ，同じ空間として認識するには物理的な制約を超えなければなりません。またヒトは，感覚器情報から脳内に信号が送られ，認識，判断を行ってから行動を移すなど，認知的な情報伝達の遅延が発生します。そのため同一空間で起こる事象でさえ，ヒトの認識・判断には認知的な制約を超えなければなりません。私たちは，モノを操作する際に生じる通信などの物理的な遅延に加え，ヒトの認知による遅延に注目し，DTCにおける空間的な距離の制約を超えた「距離非依存の能力拡張」と，ヒトに依存しない認知の世界に踏み込んだ「ヒト非依存の能力拡張」の観点に注目し，ゼロレイテンシメディア技術の取り組みを開始しました。以下，この2つの能力拡張のめざす方向性と，技術概要を紹介します。

■距離非依存の能力拡張

ヒト・モノが融合し協調を行うDTCにおいて，サイバーフィジカルインタラクション層を通じて実世界へのフィードバックを行う際には，デジタルワールドプレゼンテーショ

ン層における単純な同期的時間進行ではなく、サイバー空間のフレームワークにおける時空間の概念を定めなければなりません。実世界へフィードバックを行うときには必ず物理的な通信遅延が起これ、この遅延がさまざまなアプリケーションにおいて問題となります。例えば、映像配信におけるリップシンクのずれによる違和感⁽³⁾、また近年ではVR/ARなどにおけるシステム処理による遅延から生じる映像酔い⁽⁴⁾、⁽⁵⁾などがあげられます。これらは、人が期待している情報と異なる感覚器情報が与えられることによる違和感から生じる⁽⁴⁾ことが分かっており、DTCにおいても大きな課題の1つとなると考えられます。

実世界へのフィードバック時もさることながら、遠隔にいる“ヒトとモノ”や“ヒトとヒト”のインタラクションにはさらに遅延が大きくなるため、融合する2つの異なる時間軸を合わせる技術が必要になります。例えば遠隔機械操作などの信号処理であれば、入力に対して生じる環境変化の予測を行うことにより、原理的にはサーバ空間では同じ時空間上の同じ時間軸に合わせることが可能です。しかし、単純な物理予測だけではヒト・モノが融合する世界にはたどり着きません。ヒトはモノを操作する際にも操作に対する感覚的なズレが生じ、訓練や慣れによって解消されることが知られています。例えば車の運転では、50 km/hで運転する状況と、300 km/hでレースを行っている状況では、ハンドリング操作とタイヤと路面の抵抗から受ける操作感異なる処理能力が使われ、認知的な時間

感覚が全く異なります。

そこで私たちは、ヒトが身体を動かし、モノを操作する際に生じる認知上の遅延（感覚的遅延と呼ぶ）と、モノを操作する際に生じるシステム的な問題と遠隔通信における遅延（物理的遅延と呼ぶ）を合わせ、環境変化の予測のみならず、脳内で行われる予測モデルに関する研究を進め、物理的遅延と感覚的遅延から生じる違和感の解消により、実空間における距離の物理的ギャップを、サイバー空間を通じて克服し、遠隔のモノを自在に操作する能力拡張の実現をめざします。

■ヒト非依存の能力拡張

ヒトがモノを操作する際に生じる認知上の遅延許容量や予測能力はヒトによって大きく異なります。例えば、外科医、飛行機パイロット、カーレーサー、プロスポーツ選手など、訓練されていないヒトと訓練された卓越技能者ではこの能力に大きな差があり、この認知的な能力差は、慣れや訓練によって習得することができます。この技能習得課程には多大な訓練を要するものもあり、一方卓越技能者の体感する世界を疑似的に体験させることが有効とされています。例えば、飛行機やカーレーサーは初めから実機による操縦を行って訓練するのではなく、フライトシミュレータやドライブシミュレータを用いて十分な訓練を行いますし、また、競泳ではロープで引っ張ってもらうことにより高速な水泳状態を体感させ、野球ではピッチングマシンの高速球にて練習を積むことにより速球の対応能力をあげる訓練を行います。近年では、筋肉に

EMS（筋電機刺激）を与えてヒトの反射神経を強化した体感をさせる能力拡張の研究もあり⁽⁶⁾、ヒトの認知的な遅延量を超えた反応が可能になります。この研究では落ちてくる棒を掴むことや、飛んでくるボールの写真を撮るなどの行為を、刺激量の変化によってあたかも自分自身で行った（行為主体感）錯覚をさせることを可能としています。

そこで私たちは、ヒトの身体的な反射機構と、推論的意思決定が行われる脳の内部モデルによる予測機構の両側面から研究を推進し、ヒトの予測能力の研究に取り組みます。さらにはこの予測能力の交換を可能とすることにより、自身の限界を、さらにはヒトの能力の限界を超えた、ヒト非依存の能力拡張の実現をめざします。

■めざす世界とその応用

距離非依存の能力拡張とヒト非依存の能力拡張により、サイバー空間における時空間を操り、実空間における距離の物理的ギャップを克服し、遠隔の物を動作するかのごとく、自在に操作する世界の実現をめざします。例えば、宇宙空間や地球の裏側にあるロボットアームなどの遠隔操作を行い、このアーム操作をリアルタイムに、人の手で「掴む」「動かす」「工作する」という感覚で動作させます。さらには、遠隔における周囲環境のヒトとモノの相互作用を考慮した予測により、ゼロを超えたマイナス遅延の世界に必要な半自律制御技術にも取り組み、DTCにおける能力拡張技術に取り組んでいきます。

■参考文献

- (1) <https://www.ntt.co.jp/svlab/DTC/whitepaper.html>
- (2) 伊藤：“運動制御ネットワーク,” 計測と制御, Vol.56, No.3, pp.161-162, 2017.
- (3) 池田・由雄：“マルチメディアにおける同期,” 電学誌, Vol.126, No.5, pp.288-291, 2006.
- (4) K. M. Stanney, R. R. Mourant, and R. S. Kennedy: “Human Factors Issues in Virtual Environments: A Review of the Literature,” in Presence, Vol.7, No.4, pp.327-351, August 1998.
- (5) 氏家・鶴飼・斎田：“映像酔いに対する運動ボタンと映像コンテンツの影響（〈特集〉サイバー空間の安全・健康・快適性）,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.9, No.4, pp.377-385, 2004.
- (6) S. Kasahara, J. Nishida, and P. Lopes: “Preemptive Action: Accelerating Human Reaction using Electrical Muscle Stimulation Without Compromising Agency,” CHI 2019, pp.1-15, Glasgow, Scotland, U.K., May 2019.



（左から）近藤 重邦 / 小池 幸生 / 松林 達史

NTTサービスエボリューション研究所では、実世界とサイバー世界を連動させることで、人を中心に据えたコミュニケーション・インタラクションサービスに資する技術の研究開発を推進してまいります。

◆問い合わせ先

NTTサービスエボリューション研究所

企画担当

TEL 046-859-2236

E-mail ev-journal-pb-ml@hco.ntt.co.jp

デジタルツインコンピューティングの社会的課題

本稿では、デジタルツインコンピューティングがリアルとバーチャルが融合した新しいデジタル社会を実現していくための社会的課題を、データ、自律エージェント、仮想社会と、セキュリティ・プライバシー、倫理・制度の3×2のマトリックスに分類して説明します。社会的課題の本質は、人が新たな豊かな生活の実現のためリアルとバーチャルの両方で不都合なく活動が行えることの探求にあります。

たかはし かつみ
高橋 克巳

NTT セキュアプラットフォーム研究所

デジタルツインコンピューティングの社会的課題とは

NTT 研究所では、リアルとバーチャルが融合した新しいデジタル社会の実現に向けて、デジタルツインコンピューティング（DTC）の研究開発を行っています。DTCの社会的課題は、人がリアルとバーチャルの両方で活動を行ったときに生じる不都合を起こさせない、あるいはそれをあらかじめ発見することです。現代人はリアル社会とバーチャル社会の両方で生活をしています。その両者の活動をストレスなくつなげることで、人の活動は拡張され、豊かな生活がもたらされると私たちは考えています。逆に1人の活動の中で、リアルとバーチャルの間になんらかのギャップ、例えば、バーチャルで活躍してもリアルで認められない、あるいはバーチャル活動が暴走してリアル活動が破壊される等、が存在するようであれば、個や社会にとってストレスや不安の元となる可能性があります。このようなギャップ（これを断絶したパラレルワールドと呼ぶことにします）の存在をどうやっ

たら予見できるのかが社会的課題の本質です。さらに、それを防ぐ、あるいは被害を小さくする技術的手段を準備していくことで、私たちが掲げたDTC構想が社会的に安定した存在になると考えています。

DTCの構成要素

DTCでは新しいデジタル社会を実現していくために、私たちはデジタルツインの考え方を取り入れました。デジタルツインとは「実世界の対象について形状、状態、機能などをサイバー空間上に写像し、正確に表現したもの」です。デジタルツインが集まることで、仮想社会がつくられます。社会的課題を詳細化する準備として、DTC全体を次の3つの構成要素でとらえてみます（図1）。



図1 DTCの構成要素

- ・ データ
- ・ データに相互作用機能がついた自律エージェント
- ・ 自律エージェントの集合で構成される仮想社会

データはモノ・ヒトを表現したものです。従来デジタルツインはモノに対して発展してきましたが、DTCが扱うデジタルツインはヒトに軸足があります。デジタルツインを単一の問題解決ではなく、社会の広さで考えようとしているため、それが汎用的で、複雑な内容を表現できる必要があると私たちは考えています。この考えで「ヒトの内面まで表現する」という目標が立てられています。

デジタルツインは自律エージェント、すなわち自律動作するシステムを想定しています。これはデジタルツインが仮想社会での活動を強化・代行することを想定しているためです。デジタルツインはツイン間でやり取りでき（演算と呼ばれる機能を用いた相互作用として実現する）、その少なくとも一部は自律的に行われる必然性があると考えています。さらに実在しない性質を持つデジタルツインをデジタルツインが生成する（派生デジタルツイン）ことも検討しています。これは私たちのチャレンジです。また、デジタルツインはシミュレーションやその他の計算をして、その結果をリアルの対象に積極的にフィードバックさせようとしています。これはリアルとバーチャルのギャップを埋めるた

めの役割を果たします。デジタルツインは自律エージェントであるだけでなく、フィードバックを受けたリアルなヒト・モノと一体で見ると、サイバーフィジカルシステムでもあります。

デジタルツインの集合とその活動を仮想社会と呼んでいます。DTCはデジタルツインを配置し動作できる環境を提供します。デジタルツインはヒトやモノのデータを内部に持つ自律エージェントですので、なんらかの社会が構成できます。前述のデジタルツインの相互作用だけでなく、ツインの動作環境や派生デジタルツインにも高度な機能を持たせること、あるいはさらに外部アプリケーションと連携することで、さまざまなタイプの仮想社会が構成できると私たちは考えています。

社会的課題の考察

DTCの目的はリアルとバーチャルが融合した新しいデジタル社会の実現で、リアルとバーチャルの間のギャップをつくらないこと、すなわち「パラレルワールド問題の解決」が社会的課題であると説明しました。

パラレルワールド問題の解決には、どのような方法があるのでしょうか。例えば、DTCが提供するデジタルツインの環境がデジタルツインの活動すべてをモニターして、統制するという方法があり得ます。専用の閉じたサービスでデジタルツインが使われる場合には否定はしませんが、私たちは一般にはこの

ようなアプローチを用いませぬ。その代わりに、DTCのそれぞれの要素が従来のデータ処理やコンピューティングの規律に従い、さらにその全体調和を図ることで、断絶したパラレルワールドを起こさせないと考えています。

この考えに従って、DTCの要素、データ、自律エージェント、仮想社会ごとに課題を論点として考察していきます。分析は技術の視点（セキュリティ・プライバシー）ルールの視点（倫理・制度）から試みます。技術は情報セキュリティ⁽¹⁾とプライバシー・フレームワーク⁽²⁾を軸としますがより広い概念を扱います。ルールは現行法に従うことはいうまでもありませんが、法の有無を問わず倫理から制度までを強くは区別せずに扱います。

データに関する論点

DTCが想定するデジタルツインのデータは以下のような性質を持ちます（図2）。

- ・データはモノ・ヒトを表現したもの
- ・パーソナルデータを含む
- ・汎用的な問題に対応するため広い範囲を記述
- ・複雑な問題に対応するために詳細に記述
- ・センサの積極的な活用
- ・さまざまなデータソースからのデータを統合
- ・他のデジタルツインにから生成されることもある

デジタルツインはデータの「かたまり」で

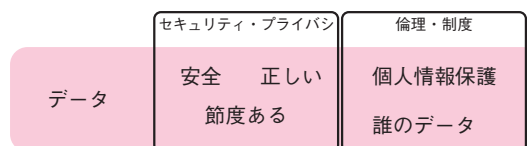


図2 DTCが想定するデジタルツインのデータ

す。DTCはヒトに対して積極的に考えていますのでパーソナルデータを多く含みます。さらにDTCではデジタルツインにより高度なコンピューティングを行わせたいために、汎用的であり、複雑な内容が表現できることをめざしています。「ヒトの内面まで再現」とすると、パーソナルデータとして強力かつ慎重な取り扱いが必要なものとなります。

DTCはデータ生成方法にも積極的な考え方を持っています。リアル世界のセンサ・キャプチャデータやウェアリングデバイスによる計測データや、ネット上での行動データを統合して使えるようにすることを検討しています。また、単なる蓄積だけではなく他のデジタルツインによるデータ生成（派生デジタルツイン）も検討しています。

上記から想定される論点には次のようなものがあります。

■セキュリティ・プライバシーからの論点

デジタルツインはデータのかたまりですので、情報セキュリティの確保は必要です。安全の基本の機密性（漏れない）と可用性（必要なときに使える）の議論はいうまでもありません。ではデジタルツインの完全性をどう

とらえるか。単純にデータの完全性（正確で欠けがない）と割り切れれば料理は簡単ですが、少し情報セキュリティの範囲を超えて、モノやヒトのデジタル空間における完全性と考えると興味深い論点となります。この完全性は極論すると、任意の問題解決に対して「あるデジタルツインが必要なデータをすべて記述しているか」となります。また、データプライバシーの文脈で推奨されている考え方にデータ最小化というものがあります。これはデータの取り扱いに節度を求めるものです。データを緻密に集めながら節度も同時に追求することが目標になります。

■倫理・制度からの論点

デジタルツインデータはパーソナルデータでもあるので、個人情報保護制度に合っていることが必要で、規制対象の個人データに該当しないとしても整合性が問われます。特に、デジタルツインの本人（主体）が、デジタルツインが生成されることやその利用目的を、どのように、どの程度理解できるように設計するのがこの論点の中心になります。

また、このデジタルツインデータは他者設置のセンサや、他のデジタルツインからのデータも取り込んで生成される、いわば共同著作物のようなものになる可能性があります。これは「データは誰のものか」という論点になります。

自律エージェントに関する論点

DTCが想定するデジタルツインの自律エージェントは以下のような性質を持ちます（図3）。

- ・ デジタルツインは自律動作するシステム
- ・ 演算と呼ばれる機能を持ち、他のツインと相互作用する
- ・ 演算機能で、新しいデジタルツイン（派生デジタルツイン）を生成する
- ・ 仮想社会を構成する
- ・ リアルと一体でサイバーフィジカルシステムを構成する

デジタルツインは対象であるヒト・モノをデータとして表現しているソフトウェアシステムです。このソフトウェアは演算と呼ばれる機能を持ち、他のツインと相互作用することで自律動作します。何をどこまでさせるか、すなわち自律の範囲はこれから順次実現されていきますが、現時点で計画されている能力の1つが、派生デジタルツインとよばれる実在しない性質を持つデジタルツインの生成です。デジタルツインは仮想社会を構成し、またリアルの実体にデータをフィードバックし

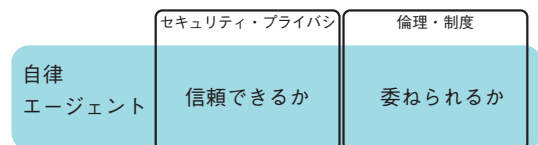


図3 DTCが想定するデジタルツインの自律エージェント

て、リアルと一体でサイバーフィジカルシステムを構成します。

上記から想定される論点には次のようなものがあります。

■セキュリティ・プライバシーからの論点

この自律エージェントへの期待は、他の多くのシステムと同様に信頼性だと考えています。いつでも期待の動作をしてくれる（ことを信じるに足りる）性質です。信頼性は多くの要件を含む概念で、ここで詳細に述べませんが、このケースに特徴的なものに、認証・認可（情報セキュリティ）、AI（人工知能）の誤動作（AIの立場）、物理的安全さ・セキュリティ（サイバーフィジカルシステムの立場）などがあります。

■倫理・制度からの論点

第1の論点は、このツインに「仕事を委ねて大丈夫か」という点です。委ねるかどうかの判断が客観的にできるかどうかということが技術課題解決の糸口となります。これはAI倫理の文脈でよく語られる、透明性や説明可能性といった概念が関係すると考えられます。第2に、委ねて良いと判断できるのであれば、その委託の社会的位置付けです。この自律エージェントは道具なのか、代理人なのか、分身なのか、といったことを検討し制度との関係を落とし込んでいきます。この論点の派生論点として、ツインを使って良いのか、というものがあります。家で勉強するときにはスマートフォンを使って良いが、試験会

場には持ち込めない、といった問題です。第3に、ツインにさせていけない仕事があるかという論点があります。法律に反することはいいませんが、それ以外はどうか。例えば、派生デジタルツインを例にとってみると、他人が誰かのデジタルツインをつくるとはどのように解釈されるのか、つくって良いものと悪いものがあるのか、などが論点となります（ちなみに、つくったデータは誰のものかというデータに関する論点も存在します）。

仮想社会に関する論点

DTCの考える仮想社会は、前述のとおりデジタルツインの集合とその活動によってつくられるものです。仮想社会は外部アプリケーションとの連携で実現されることもありますし、デジタルツインの本人（主体）との連携によるサイバーフィジカルシステムを含んだものも考えられます。仮想社会のバリエーションは多く、さらにその責任主体もさまざまなケースが考えられますが、今回は一般的な論点を上げることとします（図4）。

■セキュリティ・プライバシーからの論点

仮想社会への一般的かつ代表的な期待は、

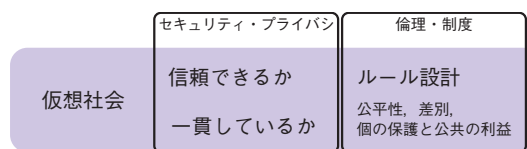


図4 DTCの考える仮想社会

自律エージェントと同様に信頼性で、サイバーセキュリティ対策がより重要です。さらに加えて一貫性の担保が大事な論点となります。一貫性とはデジタルツインの「状態」とその主体の「状態」に矛盾がないことです。ツインは1つとは限りませんのでツイン間の矛盾も含みます。例えば、ある主体の持ち物をツインAが売却し、同時にツインBが廃棄してしまうようなことが起こると一貫性がなくなります（トランザクション管理）。仮想社会では、「どこまでトランザクション管理が必要か」が最初の問いになり、これがパラレルワールド問題への1つの鍵となります。

■倫理・制度からの論点

自律エージェントが構成する仮想社会の論点で大事なものが、その社会のルール設計です。各エージェントが勝手に振る舞い出すことをどう制約するかという問題です。例えば、有限リソースの分配（公平性の担保）や、基本的な禁止事項の有無（例えば、差別の排除）が挙げられます。加えて、公共の利益のための対応、例えば災害やパンデミック対応のために、個の保護を上書きするルールを許すのか、という論点もあると考えています。

今後の展開

本稿ではDTCのねらいを説明し、そのための解決すべき社会的課題を、データ、自律エージェント、仮想社会の3要素に分解し、セキュリティ・プライバシーおよび倫理・制度

の視点から論点として説明しました。これらを謙虚に考え続けることで、リアルとバーチャルが融合した新しいデジタル社会の実現が達成できると考えています。

■参考文献

- (1) ISO/IEC 27000: 2018: "Information technology — Security techniques — Information security management systems — Overview and vocabulary," 2018.
- (2) ISO/IEC 29100: 2011: "Information technology — Security techniques — Privacy framework," 2011.



高橋 克巳

未来のパラレルワールドをDTCで気持ちよく歩きましょう。

◆問い合わせ先

NTTセキュアプラットフォーム研究所
企画担当
E-mail scplab@hco.ntt.co.jp

主役登場

私が夢見るDTCの世界

藪下 浩子

NTTデジタルツインコンピューティング研究センタ



綺麗な景色や美味しそうな料理、びっくりした光景など、感情がゆずぶられるシーンを目にしたとき、スマートフォンを取り出して対象を撮影する。皆さんにもそんな習慣はありませんか。

映画や小説のように、限られた発信者の感動を楽しむサービスは古くからありましたが、SNSの流行によりそれが一般化し、誰でも簡単に感動を共有できるようになり、新たなコミュニケーションとして根付いています。自分がリアル世界で感動した内容について画像やテキストを交えてWebで共有し他者からフィードバックを得たり、その逆に他者の感動に触れたりすることで、リアル世界の時間や空間の制約を受けずに、その人を身近に感じることができます。遠方に住んでいたり、生活スタイルの違いがあったりで、リアル世界で疎遠になっていた友人さえも身近に感じられることは、SNSの魅力の1つだと思います。

一方で、自分の感動を記録することにとらわれ、せっかくリアル世界で感動シーンに対峙しているにもかかわらず、そのシーンをスマートフォンの画面越しに見つめ、撮影の良し悪しを気にしながらカメラ操作したり、テキスト編集したりしている自分に気が付き、はっと我に返り少し残念な気持ちになることがあります。現時点ではWebでのコミュニケーションのために、少なからずリアル世界での感動体験の質に良くない影響が発生している面もあるのではないのでしょうか。

さて、NTTが提唱したDTC（デジタルツインコンピューティング）は、世界中のあらゆるモノやヒトすべてをセンシングして、再現したりシミュレーションに活用したりす

る新しいコンセプトです。さまざまなユースケースが想定されますが、私はこのコンセプトの最大の魅力は、ヒトの内面理解と他者共有だと考えています。これまでも360度全天球カメラ映像のように、リアル世界をセンシングし、それを写實的に再現する技術はありました。ただし、人間は必ずしもリアル世界をありのまま正確にとらえているとは限りません。周囲に広がるリアル世界の一部を、注目したり見落とししたり、また無意識的に誇張したり脚色したりして記憶しています。そしてこの事象のとらえ方は、その人の性格や過去の経験などに基づき異なるものでしょう。例えば子どもの運動会の応援に訪れた親は、会場の様子や他の大勢の子どもたちよりも自身の子どもに注目し、時に過去の思い出も振り返りつつ、さまざまな感情を抱くと思いますが、その感動のベクトルは各々異なると思います。DTCは、リアル世界を写實的にとらえるだけではなく、個人がどのようにその事象をとらえたかを表現し、さらに受け手の感じ方に合わせて表現を調整する可能性を持ったコンセプトであると考えます。そのため同一のシーンにおいても個々の感動のベクトルごとに多様なリアル世界の表現ができ、自身の感動を正しく他者と共有し合うことができるようになるかもしれません。

本コンセプト実現にあたっては、乗り越えなければならない課題がたくさんあります。しかしかつてのように手放しにリアル世界での感動に心から浸りきり、かつWebでの共有と共感も楽しむ、そんな日を夢見て鋭意検討を進めていきたいと思っています。